

TURBULÊNCIA

Descomplicada

Por *Ivan Bitar Fiuza de Mello

Um guia para pilotos



O autor é Piloto Privado de Avião, Meteorologista e Mestre em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), onde atuou no estudo da Turbulência de Céu Claro (CAT). Foi palestrante sobre os Impactos da Turbulência na Segurança de Voo e trabalhou como Professor de Meteorologia Aeronáutica em Escolas Técnicas de Aviação Civil.

Setembro de 2016

1. INTRODUÇÃO

O planejamento e o gerenciamento de voos em áreas de turbulência, considerados os riscos e ameaças envolvidos, exige de todo piloto um maior conhecimento do fenômeno, incluídas informações essenciais sobre os seus possíveis impactos em aeronaves.

Segundo a NTSB (National Transportation Safety Board), o fenômeno da turbulência se apresenta, estatisticamente, como a principal causa de lesões de maior gravidade em passageiros e tripulações, comparativamente a qualquer outra classe de acidente. A NTSB ressalta, também, que, entre os anos de 2000 e 2011, a turbulência foi responsável por 71% de um total de 446 acidentes aeronáuticos atribuídos a condições de tempo nos Estados Unidos. Segundo dados da fonte Aviation Herald, entre Dezembro de 2005 e Maio de 2016, mais de 300 reportes em todo o mundo de acidentes ou incidentes aeronáuticos decorrentes de eventos de turbulência, foram computados em todo o mundo. No Brasil, diariamente aeronaves reportam encontrar áreas de turbulência, em sua grande maioria de intensidade leve e moderada. Entretanto, isso já pode ser suficiente para causar nos voos, desvios de rota, mudanças de altitude e velocidade, desconforto e susto aos passageiros e tripulações, maior consumo de combustível e atrasos nos voos.

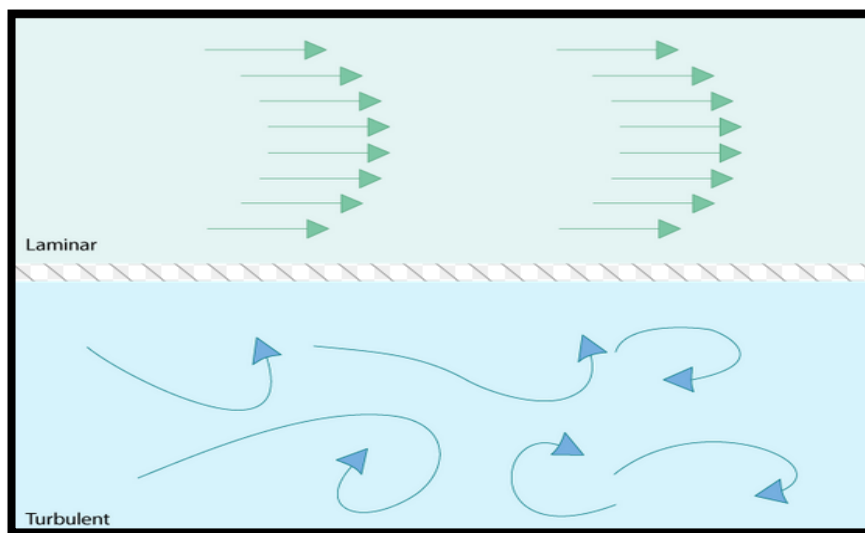
Neste artigo, vamos apresentar inúmeros tópicos sobre o tema, importantes e recomendáveis para que a segurança seja prioridade em seu voo.

2. A DEFINIÇÃO DE TURBULÊNCIA

O conceito de turbulência pode ser descrito como um movimento ou distúrbio atmosférico que se caracteriza pela mudança da direção e da velocidade do vento, resultante das variações de pressão e temperatura que ocorrem em uma massa de ar. O conceito pode também ser aplicado quando se ocorre uma alteração na velocidade e na direção de deslocamento de uma corrente de ar por conta da presença de barreiras naturais, como montanhas, ou artificiais, como prédios. As constantes variações que afetam o escoamento das partículas de uma massa de ar e as mudanças de velocidade e direção de deslocamento de uma corrente de ar originam bruscos movimentos verticais ascendentes e descendentes atribuindo-se a essa ocorrência o conceito de turbulência.

O fenômeno da turbulência pode ser concebido de duas maneiras: a Turbulência Clássica e a Turbulência Aeronáutica. A turbulência clássica se baseia mais em uma definição física sobre o comportamento caótico e estranho de um fluido em movimento quando perturbado por alguma fonte. A turbulência aeronáutica se refere ao impacto do fenômeno sobre uma aeronave e os solavancos sentidos a bordo, sendo este caso o objeto principal deste capítulo.

Figura 1: Imagem mostrando o comportamento do escoamento do vento em um fluxo laminar e um fluxo turbulento (turbulência).



Fonte: Adaptada de Alex Jacobsen (2006) / Education.

3. A TURBULÊNCIA NA AVIAÇÃO GERAL

A turbulência é um fenômeno de grande importância e relevância na aviação em geral, pois apresenta um sério risco às atividades aéreas. Segundo a Federal Aviation Administration (FAA), o fenômeno gera um custo anual médio entre 100 e 150 milhões de dólares anualmente para as empresas aéreas em todo o mundo. As circunstâncias potenciais para a presença de áreas de turbulência podem ser encontradas em todas as etapas de voo, tanto na decolagem, subida, cruzeiro, descida e pouso, ou como também em procedimentos de voo em órbita, quando há certa quantidade de tráfego aéreo na região.

As condições propícias à formação de áreas de turbulência podem ocorrer em qualquer localidade, altitude, horário e período do ano. As turbulências convectivas ocorrem com maior frequência na primavera e no verão. As turbulências térmicas ocorrem em dias quentes e úmidos ou quentes e secos, quando há significativas trocas de calor entre camadas de ar próximas à superfície. As turbulências mecânicas ocorrem quando edifícios, torres, hangares e pontes se encontram próximos a aeroportos ou quando se sobrevoa grandes cidades contendo tais estruturas. As turbulências orográficas ocorrem em regiões serranas e montanhosas em qualquer época do ano. As turbulências de céu claro podem ocorrer em qualquer época do ano, com enfoque para as decorrentes da corrente de jato, mais frequentes no outono e no inverno.

O reconhecimento dos sistemas meteorológicos presentes, das condições atmosféricas presentes e do relevo das regiões em que o seu voo irá sobrevoar é de grande relevância em se estimar áreas de maior ou menor probabilidade à formação de turbulência.

Os principais sistemas e elementos meteorológicos responsáveis pela incidência de áreas de turbulência no Brasil são:

- Nuvens cumuliformes (Cumulonimbus – CB, Cumulus Congestus – TCU e Cumulus – Cu),
- Sistemas frontais (Frentes Frias, Frentes Quentes, Frentes Oclusas e Frentes Estacionárias).
- Correntes verticais ascendentes ou bolsões de ar quente (Térmicas).
- Nuvens estratiformes (Cirrus – Ci, Cirrocumulus – Cc e Cirrostratus – Cs).
- Corrente de Jato Subtropical, Corrente de Jato Polar Norte e Corrente de Jato Polar Sul.

4. O IMPACTO DA TURBULÊNCIA NA SEGURANÇA DE VOO

A turbulência pode causar impactos indesejados e, algumas vezes, perigosos aos voos. Quando ocorre em intensidade leve, pode causar desconforto aos passageiros e suaves solavancos na aeronave. Quando de intensidade moderada, pode provocar susto, mal estar e maior desconforto a passageiros e tripulações, assim como a saída do envelope de voo (variações contínuas de velocidade, direção e altitude) da aeronave. Na condição de intensidade severa, pode implicar em avarias na estrutura da aeronave, saídas abruptas e perigosas do envelope de voo e situação de desespero, medo e intenso mal estar aos passageiros.

Em situações de turbulência, as intensas forças aerodinâmicas que impactam a aeronave podem causar danos estruturais e desgaste nas superfícies de comando, como também na estrutura da aeronave. O súbito aumento e diminuição da sustentação, das cargas G, do empuxo e do arrasto provocam um grande desbalanceamento na aeronave em voo. Em condições de turbulência moderada a severa, o voo de aeronaves de pequeno porte acaba se tornando uma missão de extrema periculosidade e, muitas vezes, impossível.

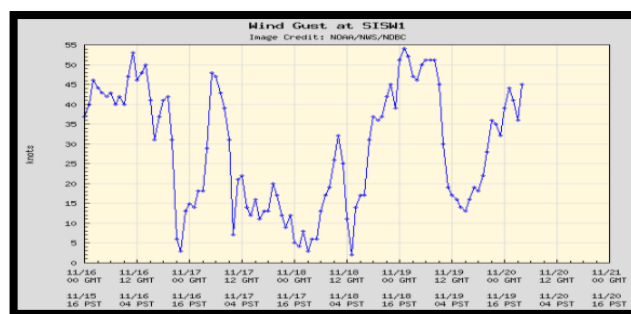
5. MECANISMOS DE VISUALIZAÇÃO DA TURBULÊNCIA

Os fluídos, ao serem perturbados por alguma fonte, produzem ondas de choque e movimentos oscilatórios ao longo de uma área em um espaço de tempo. De acordo com Lester (1994), os três principais processos de visualização do fenômeno são:

- Rajadas de vento: Podem ser caracterizadas quando se considera uma média da velocidade do vento em um dado período de tempo, em um determinado local (como um aeroporto), e o vento instantâneo, ao qual é descrito na forma de pequenos ou grandes desvios dessa média de velocidade, ao longo de um dado período de tempo. Se os desvios são muito grandes da média, então temos a presença de rajadas de vento.
- Redemoinhos Turbulentos: Podem ser descritos como vórtices inseridos em um fluxo de vento. Esses redemoinhos podem girar, alongar, comprimir e se desfazer, podendo possuir uma grande variedade de formatos, tamanhos e orientações.

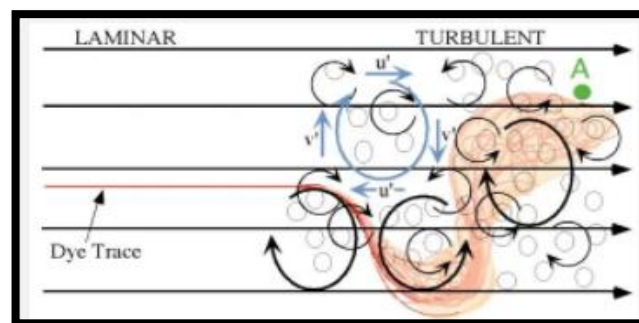
- Movimentos Ondulatórios: Ocorrem em diversos fluidos, como a água e o ar. No nosso caso, como estamos tratando de atmosfera, esses movimentos também ali se fazem presentes. Tais movimentos apresentam uma amplitude (na vertical) e um comprimento de onda (na horizontal), manifestando-se na relação entre a média da velocidade do vento e o vento instantâneo em seus picos de máxima ou mínima velocidade. Se as amplitudes forem grandes e os comprimentos de onda forem pequenos, teremos aí movimentos ondulatórios mais severos.

Figura 2: Imagem mostrando a visualização da turbulência através de rajadas de vento.



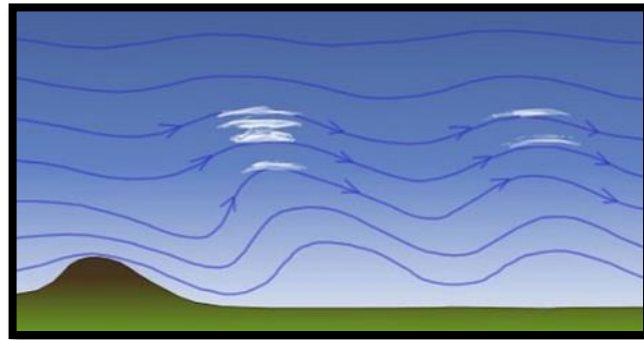
Fonte: Cliffmass.

Figura 3: Imagem mostrando a visualização da turbulência através dos redemoinhos turbulentos.



Fonte: Adaptado de Massachusetts Institute of Technology (MIT) / Naturphilosophie.

Figura 4: Imagem mostrando a visualização da turbulência através dos movimentos ondulatórios.



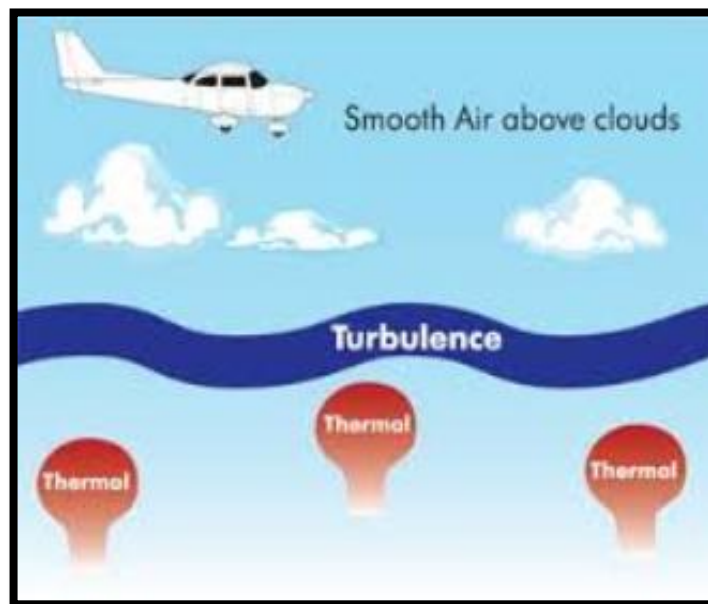
Fonte: Microlighters.

6. MECANISMOS DE FORMAÇÃO DA TURBULÊNCIA

Para se entender melhor, do ponto de vista físico e prático, os quatro principais processos de formação da turbulência são (LESTER,1994):

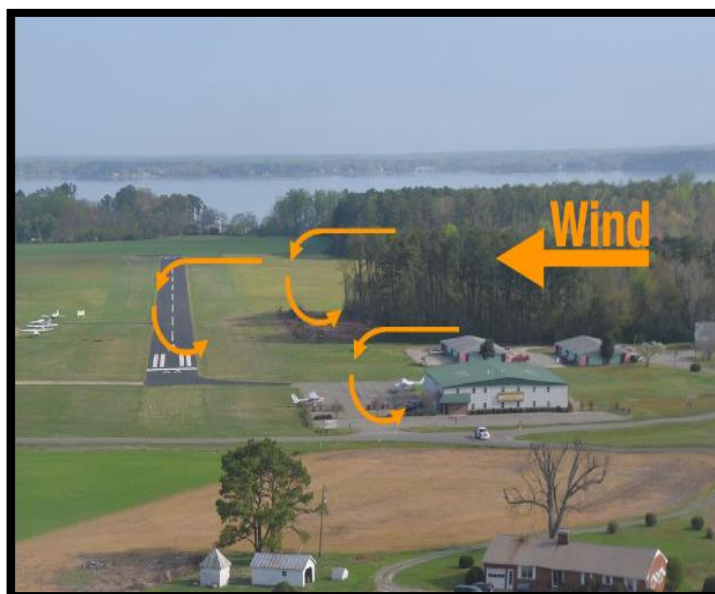
- Convecção: Ocorre com a subida de ar quente e úmido para níveis mais altos da atmosfera no formato de bolsões de ar (térmicas) ou redemoinhos. Dependendo do tamanho e da força desses bolsões ou redemoinhos, podemos ter a presença de um fluxo turbulento em baixos níveis.
- Rugosidade da superfície: Influencia diretamente sobre o ar acima dela, criando redemoinhos de vento. Os tamanhos, formatos e a força desses redemoinhos são formados a partir da complexidade do tipo de superfície, sejam acidentadas, florestas, regiões descampadas, cidades etc.
- Ondas de gravidade atmosféricas: São formadas a partir de movimentos periódicos que resultam do deslocamento vertical de uma camada de ar estável, para cima ou para baixo, particularmente em regiões montanhosas. Essas ondas podem ser propagadas por alguns metros ou quilômetros de distância, horizontalmente quanto verticalmente.
- Windshear: Ocorre quando há uma mudança da direção e na velocidade do vento em uma determinada distância, em alguma camada da atmosfera. É composta pelo windshear horizontal que é a mudança do vento num direcionamento horizontal, e o windshear vertical, quando a mudança se dá num direcionamento vertical.

Figura 5: Imagem mostrando a formação da turbulência através do processo de convecção.



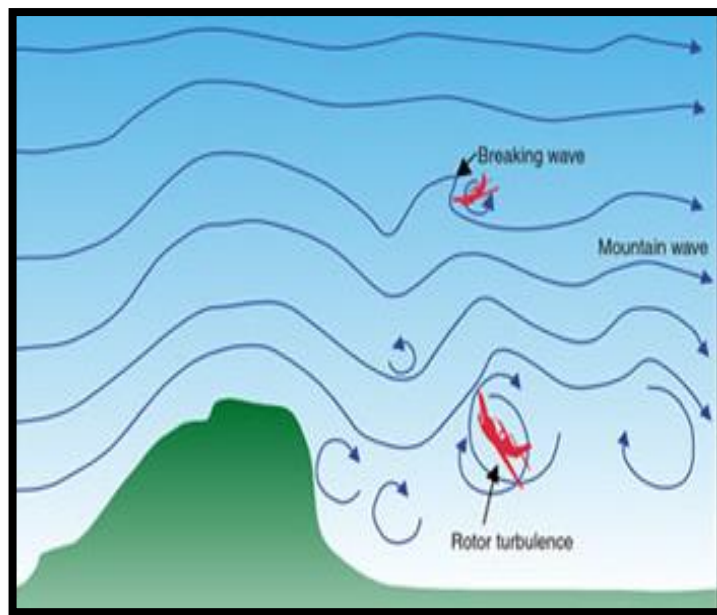
Fonte: AOPA.

Figura 6: Imagem mostrando a formação da turbulência decorrente da rugosidade da superfície.



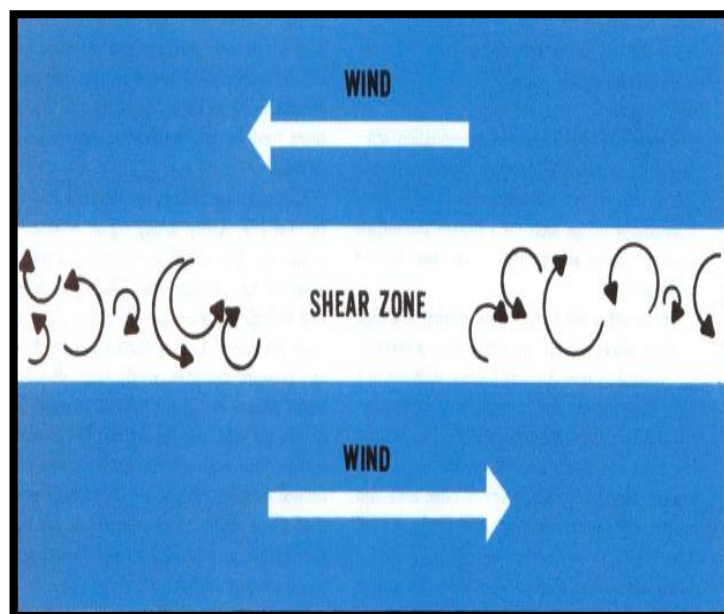
Fonte: Bold Method.

Figura 7: Imagem mostrando a formação da turbulência decorrente das ondas de gravidade.



Fonte: Australian Transportation Safety Bureau.

Figura 8: Imagem mostrando a formação da turbulência decorrente do processo de windshear.



Fonte: Aviation Wheather.

7. INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA

Atualmente na aviação, existem duas medidas de intensidade da turbulência, as qualitativas e as quantitativas.

De acordo com Lester (1994), as medidas qualitativas como os reportes AIREPS e PIREPS, têm um lado positivo e um lado negativo. No lado positivo, os reportes avaliam, diante de um evento de turbulência, a reação no interior e exterior da aeronave e as informações de localidade, horário (UTC), intensidade, tipo, altitude, duração e tipo de aeronave. No lado negativo, considera-se a subjetividade dos reportes, que sempre dependerão da experiência e da sensibilidade do piloto. Muitos podem reportar exageradamente, para mais ou para menos, diante da real situação, enquanto que muitos não reportam o tipo de aeronave que pilotam, a altitude que se encontram e a velocidade em que voam. Como ilustração, podemos exemplificar um evento de turbulência leve reportada por um piloto de um Boeing 737, que possui pouco conhecimento e sensibilidade diante da situação. Um reporte mal circunstanciado pode criar sérios problemas para aeronaves menores, de pequeno porte, já que uma turbulência considerada leve para uma aeronave tipo Boeing 737, pode representar uma turbulência severa para uma aeronave do tipo Cessna 172.

As medidas quantitativas, à sua vez, apresentam aspectos mais positivos que negativos, por razão de que são efetuadas por vias numéricas de maior precisão, pouco influenciadas pela subjetividade do ser humano.

Segundo Lester (1994), as estimativas numéricas medidas são as flutuações de velocidade (definida, como a máxima variação de velocidade a partir da velocidade indicada de voo em condições de turbulência), as rajadas derivadas (definida como a estimativa da velocidade de determinada rajada vertical de vento que impacta determinada aeronave, ou seja, a variação de altitude a partir da altitude padrão de voo decorrente do impacto de determinada rajada de vento vertical na aeronave) e a aceleração vertical (definida como o pico de desvio da aceleração normal da gravidade de 1.0g medida no centro de gravidade da aeronave). Os aspectos negativos decorrem do fato que as medidas quantitativas são apenas um aperfeiçoamento das medidas qualitativas, uma vez que ainda não abordam, detalhadamente, o efeito do design da aeronave e a maneira pela qual o piloto pilota uma aeronave numa região de turbulência.

De acordo com o UK Met Office Handbook de Meteorologia de Aviação e a WMO, a turbulência é categorizada como leve, moderada ou severa com os seguintes limiares:

- Turbulência leve: As flutuações de velocidade da aeronave ocorrem na ordem de 2.6 a 8 m/s (5 a 14,9 kts), com velocidades de rajada na margem de 1,5 a 6 m/s (5 a 20 pés/segundo). Os passageiros podem ser obrigados a usar cintos de segurança, mas objetos soltos dentro da aeronave permanecem em repouso. São os tipos mais comuns encontrados, ocasionando, tão somente, pequenas oscilações e suaves solavancos.
- Turbulência moderada: As flutuações de velocidade da aeronave ocorrem na ordem de 8 a 13 m/s (15 a 24,9 kts), com velocidades de rajada na margem de 6 a 11 m/s (20 a 35 pés/segundo), durando, aproximadamente, 11 minutos. O uso dos cintos de segurança é indiscutivelmente obrigatório, objetos soltos se movem e o deslocamento pela aeronave se torna difícil.
- Turbulência severa: As flutuações de velocidade da aeronave são iguais ou superiores a 13 m/s (25 kts), ocorrem com velocidades de rajada de 11 a 30 m/s (35 a 50 pés/segundo), durando aproximadamente 7 minutos. A aeronave pode perder o controle momentaneamente e sofrer danos estruturais. Passageiros podem ser lançados violentamente em seus assentos e objetos soltos atirados pelo interior da aeronave.

Figura 9: Índice de magnitude das medidas qualitativas da turbulência reportadas por dados AIREPS e PIREPS.



Fonte: Adaptada de Turbulence Forecast.

Figura 10: Parâmetros das medidas quantitativas de análise da turbulência assimiladas por computadores de bordo em aeronaves modernas.

Intensity	Airspeed Fluctuation (knots)	Vertical Acceleration (g)	Derived Gust (fpm)
<i>Light</i>	5 – 14.9	0.20 – 0.49	300 -1,199
<i>Moderate</i>	15 – 24.9	0.50 – 0.99	1,200 – 2,099
<i>Severe</i>	≥ 25	1.0 – 1.99	2,100 – 2,999
<i>Extreme</i>	-	≥ 2.00	≥ 3,000

Fonte: Lester (1994).

8. TIPOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência em geral, pode se classificar em quatro principais grupos:

- Turbulências em baixos níveis que ocorrem nas primeiras centenas de metros na atmosfera, próximas à superfície.
- Turbulências decorrentes de nuvens de tempestade.
- Turbulências de céu claro que ocorrem na atmosfera livre, em sua maior parte em grandes altitudes sem presença de atividade convectiva próxima.
- Turbulências decorrentes de ondas de montanhas, que ocorrem em regiões montanhosas ou acidentadas.

A turbulência em baixos níveis pode ser classificada em três tipos:

- Turbulência Térmica: Causada pelas correntes de ar convectivas verticais decorrentes do aquecimento diferencial do solo e da camada de ar acima dele, sobre áreas urbanas ou sobre o campo, originando bolsões de ar quente turbulento que se elevam na atmosfera. O transporte ou deslocamento de ar frio sobre o solo mais quente pode também gerar correntes de ar convectivas verticais.
- Turbulência Mecânica: Ocorre próxima à superfície, pois se origina da dispersão do fluxo do vento por meio de barreiras artificiais, como edifícios, torres, hangares, morros, vales, afetando aeronaves que se deslocam a baixa altitude.
- Esteiras de Turbulência: Este distúrbio ocorre durante pousos e decolagens, quando intensos redemoinhos e vórtices, que podem chegar até 300 km/h, são produzidos na ponta das asas dos aviões, dependendo do tamanho e peso da aeronave. Manifestam-se quando o fluxo de ar que passa abaixo da asa de uma aeronave (intradorso) é conduzido para a área acima da asa de uma aeronave (extradorso), através da diferença de pressão maior no intradorso e menor no extradorso. Caso encontre esteiras de turbulência, é importante não aplicar movimentos bruscos nos ailerons, leme de direção e profundor. Essa medida visa a evitar o desgaste da estrutura da aeronave e o rompimento de cabos que conectam as superfícies de comando. Segundo o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), os mínimos de separação em relação à esteira de turbulência são:

Figura 11: Mínimos de separação em relação à esteira de turbulência.

Aeronave que segue a frente	Aeronave que segue atrás	Mínimos
AIRBUS A380-800	Airbus A380-800	Não requerido
	Aeronave Pesada	6 NM
	Aeronave Média	7 NM
	Aeronave Leve	8 NM
Aeronave Pesada	Aeronave Pesada	4 NM
	Aeronave Média	5 NM
	Aeronave Leve	6 NM
Aeronave Média	Aeronave Leve	5 NM

A turbulência em baixos níveis pode ocorrer também em situações de:

- Inversão térmica da camada limite.
- Windshear frontal próximo à superfície.
- Ventos fortes próximos à superfície em áreas frontais.
- Camadas estáveis elevadas próximas à superfície.
- Abrupta convecção próxima à superfície (redemoinhos de vento – dust devils).
- Correntes térmicas secas.

Figura 12: Esquematização dos tipos de turbulências em baixos níveis.



Fonte: Bold Method / AOPA / Aviation Weather / Roger-Wilco

- Turbulência Convectiva: Decorre de correntes de ar verticais de ar ascendentes e descendentes. É mais severa no núcleo de nuvens de tempestades. São conhecidas como turbulências frontais quando associadas a sistemas frontais como frentes frias, quentes, oclusas e estacionárias. A turbulência convectiva pode ser encontrada no interior dos seguintes sistemas e fenômenos meteorológicos:
- Nuvens Cumulus (Cu).
- Nuvens Cumulus Congestus (TCU).
- Nuvens Cumulonimbus (CB).
- Nuvens Supercélulas.
- Linhas de Instabilidade.
- Sistemas frontais (frentes frias, frentes quentes, etc).
- Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).
- Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM).
- Ciclones Tropicais, Extratropicais e Subtropicais.

Figura 13: Esquematização de regiões propícias à formação de turbulências convectivas.



Fonte: Jeff Wise.

- Turbulência de Céu Claro (CAT): É um tipo de turbulência que ocorre em condições de céu claro sem presença de atividade convectiva próxima. Ocorre com maior frequência a grandes altitudes associada com regiões de alta pressão, áreas pré-frontais, correntes de jato e ondas de montanha. A CAT pode, também, se desenvolver em áreas de forte cisalhamento do vento a grandes altitudes, no encontro entre camadas de ar com densidades e velocidades de deslocamento diferentes e na existência de ondas de gravidade atmosféricas.

A turbulência de céu claro pode ocorrer nas seguintes condições:

- Entre 2000 pés acima e 6000 pés abaixo da tropopausa.
- Próximo e abaixo do núcleo da corrente de jato.
- Áreas de inversão térmica próximas à superfície associadas com jatos de baixos níveis.
- Proximidades e acima dos topos de nuvens de tempestade.
- Existência de nuvens lenticulares, nuvens rotoras (rotor clouds), nuvens rolo (roll clouds), nuvens capão (cap clouds), nuvens no formato de ondas (wave clouds), nuvens cirrus e cirrocumulus em grandes altitudes (billow clouds).

Figura 14: Esquematização de áreas de turbulência de céu claro associadas com correntes de jato, ventos fortes em grandes altitudes e camadas de ar com velocidade e deslocamentos distintos.



Fonte: Weather / Earth Sky / Weather Wiz Kids.

- Turbulência de Ondas de Montanha (Orográfica): É formada a partir de uma forte corrente ou fluxo de ar que se desloca perpendicularmente sobre uma montanha. O ar sobe a barlavento, aumenta sua velocidade mecanicamente, desce a sotavento e se propaga verticalmente no formato de intensas correntes verticais (ondas de montanhas) em níveis superiores e redemoinhos turbulentos em níveis inferiores.

A turbulência decorrente de ondas de montanha pode ocorrer na existência dos seguintes fenômenos:

- Ondas de montanhas associadas à sistemas frontais.
- Ondas de montanhas associadas à correntes de jato.
- Ondas de montanhas associadas à orografia do terreno.
- Ventos fortes a sotavento de montanhas e serras.
- Ventos fortes formados em picos isolados de montanhas e serras.
- Fortes correntes de ar frio em baixos níveis próximo a montanhas.
- Nuvens rotoras (rotor clouds), nuvens do tipo tampão (cap clouds) e nuvens lenticulares do tipo cirrocumulus lenticulares e altocumulus lenticulares próximas a montanhas.

Figura 15: Esquematização de regiões propícias à formação de turbulências decorrentes de ondas de montanha.



Fonte: Esri / Premier Flight Center / Cfi Notebook.

Figura 16: Esquematização do perfil das correntes de vento associadas próximas a regiões montanhosas.



Fonte: MetEd Ucar.

9. A PERIGOSA TURBULÊNCIA DE CÉU CLARO

A turbulência de céu claro (CAT) se apresenta como um dos fenômenos mais perigosos e imprevisíveis que afetam a aviação em geral. Radares meteorológicos instalados em aeronaves, nos dias atuais, não possuem tecnologias de detecção da CAT, mas unicamente em detectar densas formações e nuvens de tempestades, formadas a partir de gotículas de água e gelo.

Afirma-se que as probabilidades de se antecipar áreas de CAT são muito pequenas, mesmo com um bom conhecimento do previsor sobre fenômenos de grande escala que podem estar influenciando na formação da turbulência (Lester, 1994).

Hoje no meio aeronáutico, as previsões de CAT são relatadas por meio de reportes de aeronaves que estiveram na região da turbulência e repassadas para as cartas SIGWX. Porém, pelo fato da CAT ser um fenômeno de microescala e apresentar bruscas mudanças em seu comportamento e suas características, podendo se dispersar em uma rápida escala espacial, as cartas nem sempre trazem um bom acerto na previsão de uma CAT.

Índices de turbulência não necessariamente possuem uma grande confiabilidade quando aplicados a saídas de modelo de previsão do tempo com o intuito de se detectar a CAT; entretanto, apresentam aos previsores uma boa probabilidade de se encontrar regiões que possuem ou não uma significativa probabilidade de ocorrência de fortes turbulências (Ellrod e Knapp, 1992).

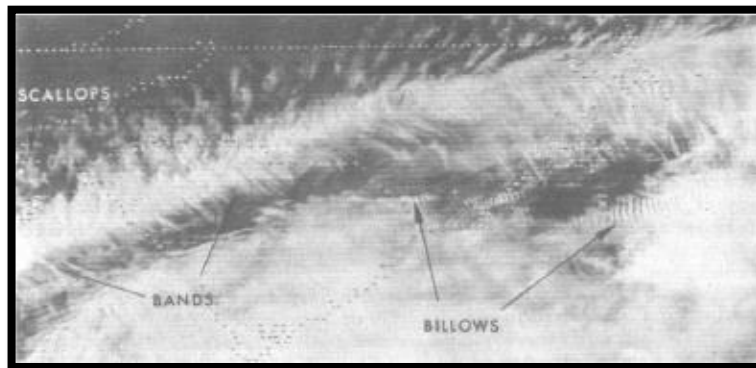
Imagens de satélite são capazes de fornecer um bom indicativo à detecção de regiões com a presença de CAT, apesar do uso da tecnologia do sensoriamento remoto ser de difícil previsibilidade (KNOX, 2001). Assinaturas provenientes de imagens de satélite no canal do vapor d'água, visível e infravermelho, estão associadas com grande parte da formação da CAT na qual bandas de nuvens cirrus, transversais à direção do vento, estão presentes Overeem (2002).

A presença de nuvens transversais próximas à região do jato subtropical indica grande magnitude no cisalhamento vertical e horizontal do vento, características associadas à possível presença da CAT (Ellrod, 2000).

A presença de nuvens no formato de ondas e bandas de nuvens transversais ao fluxo do vento podem, também, ser bons indicativos de CAT, pois, apesar de diferirem em escala espacial, apresentam características em comum, como nuvens cirrus e nuvens de níveis médios em sua composição atmosférica, estando perpendicular a direção do vento.

Outras tecnologias em desenvolvimento para a detecção da CAT estão sendo testadas e aprimoradas pela NASA, instituições científicas e empresas aéreas como a Delta Airlines. A criação de radares meteorológicos que se utilizam de tecnologias de ponta, como algoritmos de turbulência e técnicas de radiação ultravioleta em ondas curtas embutidos em sua dinâmica de funcionamento, se apresentam como as mais recentes inovações na busca pela detecção da CAT.

Figura 17: Imagem do satélite indicando potenciais áreas de CAT através de nuvens no formato de ondas (billows) e bandas de nuvens transversais (bands) ao fluxo do vento.



Fonte: Adptada de Ellrod (1989).

Figura 18: Imagem indicando potenciais áreas de CAT através de nuvens no formato de ondas resultantes do encontro entre duas camadas de ar com velocidades e densidades diferentes entre si.



Fonte: Adptada de Ellrod (1989).

10. NOVOS ESTUDOS E TECNOLOGIAS

Na tentativa de se entender e compreender o fenômeno da turbulência aeronáutica nos mais variados parâmetros, significados e definições, estudos e tecnologias foram e estão sendo desenvolvidos e aprimorados.

- Dados CVR/FDR CVR (Cockpit Voice Recorder) / FDR (Flight Data Recorder):

Dados quantitativos fornecem mais detalhadamente e de forma mais realista as forças aerodinâmicas que impactam determinada aeronave em condições de turbulência. Os parâmetros medidos são: flutuação de velocidade, aceleração vertical e rajadas derivadas.

- Índices de Turbulência:

São equações físicas, matemáticas e termodinâmicas que retratam os mecanismos de formação da turbulência. Esses índices são introduzidos em modelos numéricos de previsão do tempo e programas de computador que fornecem informações e dados de potenciais áreas de turbulência para fins de previsão e análise

- Dados ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) / AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay):

São dados transmitidos automaticamente para satélites e retransmitidos para centros de pesquisa, contendo diversas informações de determinado voo. Contém dados como a quantidade de passageiros a bordo, altitude, rota, condições meteorológicas etc. Os dados meteorológicos podem apresentar eventuais cenários de turbulência que determinada aeronave possa ter atravessado.

- Algoritmos de Previsão de Turbulência:

A instalação de algoritmos de previsão de turbulência em modelos numéricos de previsão do tempo e radares meteorológicos é de grande importância no objetivo de se detectar, com maior exatidão, regiões de turbulência. Suas sequências lógicas matemáticas, físicas e computacionais trazem um maior detalhamento e precisão para as previsões e técnicas de detecção de áreas de turbulência.

- Radar LIDAR de detecção de CAT (DELICAT):

Com o avanço da tecnologia em radares, um sistema de radar que se utiliza da técnica de radiação ultravioleta a laser em ondas curtas está sendo desenvolvido pelo Centro Aeroespacial Alemão e Instituto de Ciências Atmosféricas (German Aerospace Center and Institute of Atmospheric Physics – DLR), para fins de detecção de turbulências de céu claro a bordo de aeronaves. O radar se baseia no tempo de retorno da emissão do laser de volta à sua origem. Através do tempo calculado de retorno do laser, o espalhamento das moléculas de aerossóis e as oscilações de velocidade do vento perante o sinal emitido traduzem a possibilidade da existência da turbulência.

- Estudos Climatológicos:

Transmitem inúmeras informações sobre um determinado assunto. Quando aplicados à turbulência, podem nos fornecer dados e análises sobre a temporalidade, sazonalidade, intensidade, localidade, altitude e horário de ocorrência do fenômeno, para fins de desenvolvimento de novos estudos e tecnologias.

- E-TURB Radar (Enhanced Turbulence Radar):

Radar meteorológico desenvolvido pela NASA que se utiliza de algoritmos de detecção de turbulência embutidos em sua dinâmica de funcionamento. Os algoritmos detectam desvios de velocidades Doppler utilizando scans de antenas de radar múltiplas, computando a resposta de antecipação ao encontro do fenômeno e gerando um display em tempo real da localidade e da intensidade do fenômeno através de diferentes tipos de cores. A NASA está utilizando esta tecnologia junto com a Delta Airlines. O TAPS (Turbulence Automatic PIREPS System) é um sistema automático de reportes de turbulência proveniente da tecnologia do E-Turb Radar. O sistema envia automaticamente para centros de operação e aeronaves próximas reportes de turbulência. As informações automáticas são baseadas nas acelerações e flutuações que impactam as aeronaves a partir dos limiares dos algoritmos de detecção de turbulência.

- Flight Weather Viewer:

Aplicativo lançado pela companhia aérea norte-americana Delta Airlines, oferece gráficos de áreas de turbulência e previsões em tempo real para os pilotos. O sistema de dados dos sensores aviônicos das aeronaves da empresa utilizam algoritmos especiais de turbulência combinando dados dos acelerômetros verticais com dados das condições atmosféricas, como inclinação, rotação e velocidade do vento, produzindo assim, reportes de turbulência. Esses reportes são enviados automaticamente para modelos de previsão do tempo, sendo disponibilizados em tempo real no aplicativo. Alertas sobre ameaças de turbulência em rota podem ser enviados pelos pilotos da empresa no formato de notificações em áudio e visuais, sinalizando quando e onde o aviso de apertar cintos deve ser ligado e quando os pilotos necessitam estar no comando.

Este aplicativo é personalizado por tipo de aeronave, interpretando que uma aeronave 737 e outra do tipo 767 possuem diferentes impactos ante a turbulência, em razão da diferença de tamanho e peso. A redução da emissão de carbono está na dinâmica do sistema, pois através do reconhecimento de áreas de potencial ameaça de turbulência os pilotos não necessitarão efetuar desvios ou utilizar mais combustível, na procura de melhores velocidades, altitude e condições meteorológicas de voo.

Figura 19: Esquematização do E-TURB Radar / TAPS.



Fonte: ATR – USA.

Figura 20: Flight Weather Viewer.



Fonte: News Delta.

Figura 21: Radar LIDAR de detecção de CAT (DELICAT)



Fonte: Photonics Media.

REFERÊNCIAS

Aircraft Owners and Pilots Association. AOPA Online Members Online – AOPA EPILOT FLIGHT TRAINING EDITION – VOL.6 ISSUE 26. Disponível em: <<https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2006/june/30/aopa-online-members-only-aopa-epilot-flight-training-edition-vol-6-issue-26>>.

Acesso em: set.2016.

ATR-USA. Concept of Operations (CONOPS) for Turbulence Avoidance and Decision Making. Disponível em: <http://www.atr-usa.com/sub_pages/conops.html>. Acesso em: set.2016.

Australian Transportation Safety Bureau. Mountain wave turbulence. Disponível em: <https://www.atsb.gov.au/publications/2005/mountain_wave_turbulence/>. Acesso em: set.2016.

Aviation Weather. Windshear. Disponível em: <https://www.aviationweather.ws/023_Wind_Shear.php>. Acesso em: set.2016.

Bold Method. 7 Types Of Turbulence That Can Rock Your Flight. Disponível em: <<http://www.boldmethod.com/blog/lists/2016/03/types-of-turbulence-that-can-rock-your-flight/>>.

Acesso em: set.2016.

Bold Method. How To Avoid Wake Turbulence. Disponível em: <<http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aerodynamics/how-to-avoid-wake-turbulence/>>. Acesso em: set.2016.

Bolt Method. 6 Types of Spatial Disorientation. Disponível em: <<http://www.boldmethod.com/blog/lists/2015/03/6-types-of-spatial-disorientation-and-how-to-prevent-each-one/>>. Acesso em: Dez.2017.

Cfi Notebook. Clouds. Disponível em: <<http://www.cfinotebook.net/notebook/weather-and-atmosphere/clouds>>. Acesso em: set.2016.

Cliffmass. Why is Northwest Washington getting hit so hard? Defending Randy Dorn. Disponível em: <<http://cliffmass.blogspot.com.br/2009/11/why-is-northwest-washington-getting-hit.html>>. Acesso em: set.2016.

Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/circea_100-61_20151021(1).pdf>. Acesso em: set.2016.

Earth Sky. Clouds that look like ocean waves. Disponível em: <http://earthsky.org/earth/kelvin-helmholtz-clouds>. Acesso em: set.2016.

Education. Science Project: Reynolds Number: Laminar and Turbulent Flow. Disponível em: <https://www.education.com/science-fair/article/thick-liquids-faster-slower-thin/>. Adaptado de Alex Jacobsen (2006). Acesso em: set.2016.

ELLROD, G.P., An index for clear air turbulence based on horizontal deformation and vertical windshear. Preprints, Third Intl . Conf on the Aviation Weather System, Anaheim, California, Amer, Meteor. Soc., 339-344. 1989.

ELLROD, G.; KNAPP, D. An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. **Weather. Forecasting.** v.7, p.150-165, 1992.

ELLROD, G. P. Satellite images provide valuable information supplement to the aviation meteorologist, **ICAO Journal.** v.55, n.2, p.6-10, 2000.

Esri. Where Wild Winds Rule. Disponível em: <http://www.esri.com/news/arcnews/winter1011articles/where-wild.html>. Acesso em: set.2016.

Federal Aviation Administration (FAA). Disponível em: <http://www.asias.faa.gov/i/2003-2007weatherrelatedaviationaccidentstudy.pdf>. Acesso em: set.2016.

Jeff Wise. Why Thunderstorms Are So Dangerous for Airlines. Disponível em: <http://jeffwise.net/2014/12/28/why-thunderstorms-are-so-dangerous-for-airliners/>. Acesso: set.2016.

KNOX, J. A. The breakdown of balance in low potential vorticity regions: evidence from a clear air turbulence outbreak. Preprint Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics Meeting. **American Meteorological Society.** Breckenridge, Colorado, P2.4-P.2.72, June 2001.

LESTER, P. F. **Turbulence:** a new perspective for pilots. [S.l.]: Jeppesen Sanderson,. p.212. 1994.

MELLO, I. B. F. **CLIMATOLOGIA E ESTUDO DE CASO DA TURBULÊNCIA DE CÉU CLARO A PARTIR DE REGISTROS DE AERONAVES: ANÁLISE DE DADOS OBSERVACIONAIS E DE MODELAGEM**: Dissertação de mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

MetEd UCAR. Detecting Clear Air Turbulence over Southern Africa. Disponível em: <https://www.meted.ucar.edu/asmet/s_africa_a7/navmenu.php?tab=1&page=2.3.0>. Acesso em: set.2016.

Microlighters. Mountain Wave Activity in the Magaliesberg. Disponível em: <<http://microlighters.co.za/viewtopic.php?f=13&t=22059&sid=5614f107f8bfa57a1c69eb2d4f8dd075>>. Acesso em: set.2016.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Earth Science Office. Disponível em: <<https://weather.msfc.nasa.gov/>>. Acesso em: set.2016.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). NASA AVIATION TURBULENCE DETECTION SYSTEM TO BE FLOWN BY AIRLINE. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/centers/langley/news/releases/2004/04-035.html>>. Acesso em: set.2016.

National Transportation Safety Board (NTSB). Disponível em: <<http://www.asias.faa.gov/i/2003-2007weatherrelatedaviationaccidentstudy.pdf>>. 2010. Acesso em: set.2016.

Naturphilosophie. Air Turbulence, Eddies and the Kolmogorov Equations. Disponível em: <<http://www.naturphilosophie.co.uk/starry-starry-night-unexpected-maths-van-goghs-masterpiece/>>. Acesso em: set.2016.

News Delta. Disponível em: <<http://news.delta.com/groundbreaking-app-helps-delta-pilots-avoid-turbulence>>. Acesso em: set.2016.

OVEREEM, A. **Verification of clear-air turbulence forecasts**. [S.l.]: KNMI, 2002. Technisch report, 2002.

Photonics Media. Detecting Aircraft Turbulence with Laser Radar. Disponível em: <<https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=54603>>. Acesso em: set.2016.

Premier Flight Center. Standing Lenticular Clouds. Disponível em: <<https://www.premierflightct.com/newsletters/TrainingArticles/StandingLenticularClouds.html>>. Acesso em: set.2016.

Roger-Wilco. Wake turbulence gone with the wind – the CREDOS Project. Disponível em: <<http://www.roger-wilco.net/wake-turbulence-gone-with-the-wind-%E2%80%93-the-credos-project/>>. Acesso em: set.2016.

Turbulence Forecast. Disponível em: <<https://www.turbulenceforecast.com/pireps.php>>. Acesso em: set.2016.

Weather. 50+ mph Jet Stream Howls Across North Atlantic, Cuts Flight Times, Causes Damage in Scotland. Disponível em: <<https://weather.com/science/weather-explainers/news/250-plus-mph-jet-stream-north-atlantic-scotland-wind-damage>>. Acesso em: set.2016.

Weather Wiz Kids. Disponível em: <http://www.weatherwizkids.com/?page_id=64>. Acesso em: set.2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Forecasting Techniques of clear air turbulence including that associated with mountain waves. Technical Note, n. 155. 1969.